

—研究ノート—
Scientific Note

南極ドームふじにおける 1995 年から 2006 年の表面質量収支の特徴

亀田貴雄^{1*}・本山秀明²・藤田秀二²・高橋修平¹

Outline of surface mass balance at Dome Fuji, East Antarctica, by the stake method from 1995 to 2006

Takao Kameda^{1*}, Hideaki Motoyama², Shuji Fujita² and Shuhei Takahashi¹

(2007 年 9 月 1 日受付; 2007 年 12 月 8 日受理)

Abstract: This paper describes observational results of surface mass balance (SMB) at Dome Fuji (77° 19' 01" S, 39° 42' 11" E; 3810 m a.s.l.), East Antarctica from 1995 to 2006. The SMB was estimated using 36 bamboo stakes (grid of 6×6, placed at 20 m intervals). The heights of the stake tops from the snow surface were measured at 0.5 cm resolution twice monthly in 1995, 1996, 1997, and 2003, and once a year for the rest of the study period. The annual SMB from 1995 to 2006 at Dome Fuji was $27.3 \pm 1.5 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. This result agrees well with the annual SMB from AD 1260 to 1993 ($26.4 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), estimated from volcanic signals in the Dome Fuji ice core. From 1995 to 2006, there were 37 incidences of negative or zero annual SMB, which was 8.6%. Compared with similar studies at Vostok, South Pole and Dome C, we found that a site with SMB over $190 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ is expected to have annual snow accumulation at the 95 % confidence level. Sites from 1500 to 2500 m above sea level fit the criteria on the Antarctic ice sheet. According to stake and snow pit observations at Vostok, we estimated that the probability of an annual layer missing (*hiatus*) at Dome Fuji under present-day and glacial conditions are 9.4% and 11.4%, respectively. Variations of SMB measured by 36-stakes for 12 years were also analyzed.

要旨: 1995 年 1 月 25 日に南極ドームふじに 36 本雪尺 (20 m 間隔で 100 m×100 m) が第 36 次南極地域観測隊により設置され、それ以来雪尺の高さが継続的に測定されてきた。ドームふじ基地で越冬観測を実施した 4 年間 (1995 年 1 月から 1997 年 12 月及び 2003 年 1 月から 2004 年 1 月) は月 2 回測定し、それ以外は年 1 回の測定 (1 月上旬が多い) を実施した。この結果、1995 年から 2006 年までのドームふじの年平均表面質量収支は、 $27.3 \pm 1.5 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ であることが推定できた。これは、ドームふじ浅層コアから推定された西暦 1260 年から 1993 年までの平均値 ($26.4 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) と近い値であった。また、ドームふじでは 1 年後に雪尺の高さが等しいかもしくは高くなっている「負の年間表面質量収支」が 8.6% の確率で起きていることがわかった。南極内陸に位置するボストーク、南極点、ドーム C で

¹ 北見工業大学社会環境工学科雪氷研究室. Snow and Ice Research Laboratory, Department of Civil and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology, 165 Koen-cho, Kitami, Hokkaido 090-8507.

² 情報・システム研究機構国立極地研究所. National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

* Corresponding author. E-mail: kameda@mail.kitami-it.ac.jp

の同様な観測結果と比較することにより、負の年間表面質量収支は年平均表面質量収支の増加とともに減少し、 $190\text{ kg m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 以上の地点では負の年間表面質量収支は95%の信頼水準で起こらず、正の年平均表面質量収支が期待できることがわかった。 $190\text{ kg m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 以上の年平均表面質量収支は地域により異なるが、現在の南極氷床ではおおそ標高1500–2500 mに相当するので、この標高域では毎年の積雪が氷床に記録されている地点が多いことが推定できた。一方、ポストークでのビット観測結果を参考にして、現在及び氷期のドームふじコアでの年層欠損確率をそれぞれ9.4%, 11.4%と見積もった。この他に、ドームふじで1本の雪尺を1年間観測した時に得られる年平均表面質量収支の誤差、10年後の再測定で得られる年平均表面質量収支の誤差などを論じた。

1. はじめに

氷床の表面質量収支とは、氷床表面での積雪の涵養過程と消耗過程を合わせた正味の質量変化を意味する。これは氷床の涵養過程・消耗過程の理解だけにとどまらず、氷床と海水準、氷床コアの年代推定など、極地雪氷学において極めて重要な値である（例えば、Bamber and Payne, 2004）。これまで、日本南極地域観測隊では細い竹（長さ2.5 m、直径20–30 mm程度、かさ密度 $250\text{--}350\text{ kg m}^{-3}$ 程度、これを雪尺という）を雪面に差して固定し、その高さ変化として積雪量を観測してきた（例えば、Kameda *et al.*, 2007 参照）。さらに、積雪密度を用いて積雪量から表面質量収支を求めてきた（例えば、Takahashi and Watanabe, 2001; Kameda *et al.*, 1997 など）。

南極ドームふじ基地（ $77^{\circ}19'01''\text{S}$, $39^{\circ}42'11''\text{E}$, 標高3810 m a.s.l.）では、1995年1月25日に36本雪尺が第36次南極地域観測隊員の上田 豊、亀田貴雄により設置され（Azuma *et al.*, 1997）、これまでの4回の越冬期間中（1995年1月–1997年12月及び2003年1月–2004年1月）では月2回、それ以外は年1回（例年1月中旬）の測定が継続されてきた。ここでは、この観測結果を詳細に報告した Kameda *et al.* (2008) 掲載の図を引用しながら、主要な結果を報告する。

2. 測定方法

36本雪尺（各20 m間隔、全体で $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 、図1）は、基地の居住棟からほぼ東北東300 mの位置に設置した。ドームふじは氷床のドーム状頂部に位置するため卓越風向が弱いが、ブリザード時にはこの方向が主風向になることが多い。それで建物の影響を最小にするために、この方向に雪尺網を設置した。

雪尺の測定は、分解能1 mmのステンレス製のメジャーを長さ2 mの棒に貼り付けた「雪尺測定棒」を用いて、分解能0.5 cmで実施した（図2）。測定時には雪面を乱さないように、雪尺の南西側（卓越風向の風下側）を通り、雪尺の右側に雪尺測定棒を当てて雪尺高さを測定した。雪尺の周囲にくぼみができている場合には、そのくぼみからの高さではなくくぼみを考慮しない、平均的な雪面からの雪尺高さを測定した。

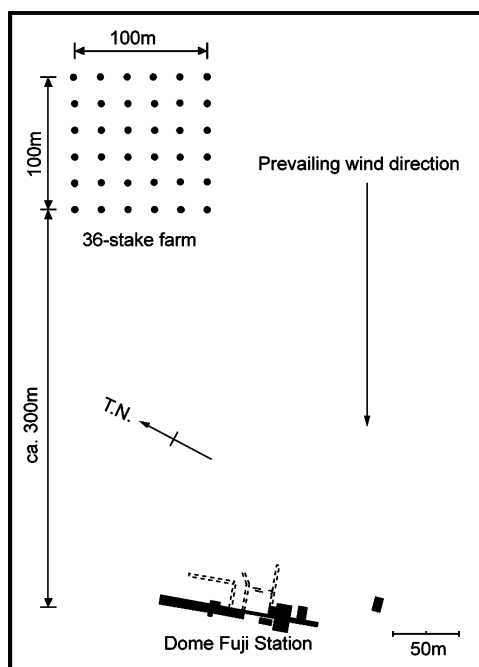


図 1 ドームふじにおける 36 本雪尺の位置.

Fig. 1. Position and array of the 36-stake farm at Dome Fuji.



図 2 36 本雪尺の測定状況（2003 年 10 月 30 日，大日方一夫氏撮影）.

Fig. 2. Measurements of the 36-stake farm (October 30, 2003, taken by Dr. I. Obinata)

測定間での雪面沈降を補正するために，測定期間における雪尺下端深度での平均積雪密度を用いて表面質量収支に換算した．積雪密度分布は，1995 年に 4 回測定した 3 m ピットでの積雪密度結果から推定した平均的な積雪密度分布を用いた（式や換算方法の詳細は，Takahashi and Kameda（2007）を参照のこと）．

3. 結果及び考察

3.1. 年間表面質量収支

図3に1995年1月25日から2007年1月9日までの12年間の年平均表面質量収支を示す。12年間での平均は、 $27.3 \pm 1.5 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ であった。これは、ドームふじ浅層コアから推定されている西暦1260年から1993年の平均値 ($26.4 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, Watanabe *et al.*, 1997) と近い値であった。つまり1995年から2006年の表面質量収支は、ドームふじでの過去730年間の平均値に近いことがわかった。

3.2. 12年間36本の累積測定及び1年間1本の雪尺測定からわかること

毎年の雪尺測定結果をそれぞれの平均的な雪尺深での積雪密度を使って、年平均表面質量収支を計算し、さらに2年間から12年間累積してから計算した年平均表面質量収支を図4-aに示す。雪面は平らになろうとするので、ある年に多く積もった積雪量は次の年に少なくなり、累積平均をとると表面質量収支は平均的な値に落ち着く。このため、累積年を増やすと標準偏差は減少する。図4-b及び4-cに示すように、累積した年平均表面質量収支の標準偏差 (SD) と標準誤差 (SE) はそれぞれ観測年 (x) の $1/\sqrt{x}$ に従い減少することがわかった。

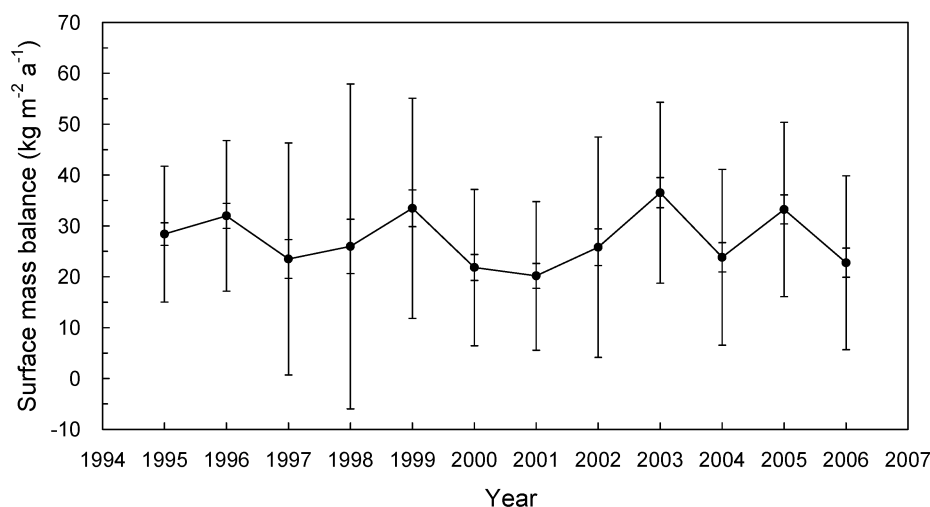


図3 1995年から2006年までのドームふじにおける年平均表面質量収支。大きな誤差範囲で標準偏差 (standard deviation), 小さな誤差範囲で標準誤差 (standard error) を示す。なお, 標準誤差は平均値の標準偏差 (standard deviation of the mean) ともいう。詳しくは Taylor (2000) の109ページを参照。

Fig. 3. Time series of the surface mass balance at Dome Fuji. The standard deviation for the 36 stakes and standard errors (standard deviation of the mean) are indicated by large and small error bars, respectively.

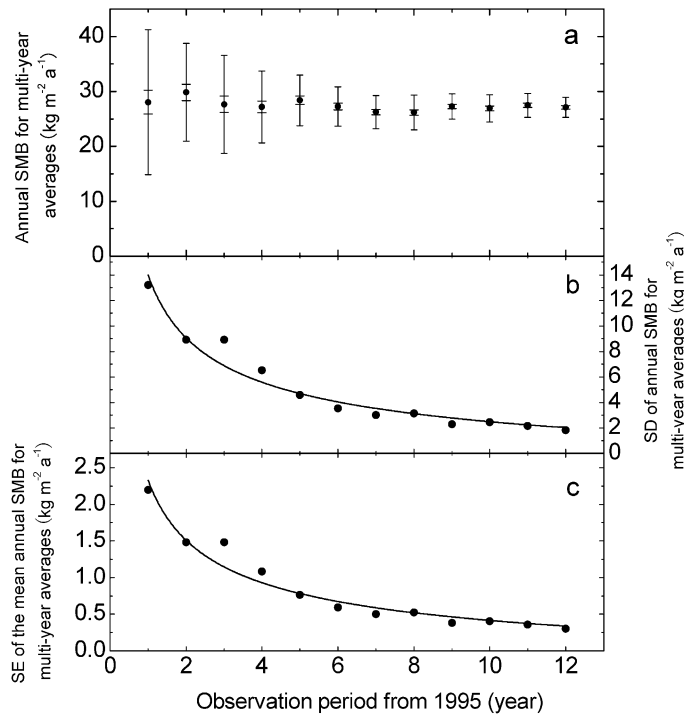


図 4 (a) 累積的な雪尺測定結果から推定する年平均表面質量収支, (b) (a) の標準偏差, (c) (a) の標準誤差

Fig. 4. The annual surface mass balance (SMB) using multi-year averages from January 1995, with standard deviation (SD, large error bars) and standard error (SE, small error bars). The first data point is the surface mass balance with SD and SE error bars for January 1995 to January 1996 (i.e. over 1 year). The second data point shows the results from January 1995 to January 1997 (i.e. over 2 years) and so on. (b) The SD and (c) the SE plotted against the total number of observation years.

また、10 年間累積した結果では、標準偏差が平均値の 1/10 以下になった。つまり、1 本の雪尺をドームふじに設置し、10 年後に再測定した場合、その結果は真値±10% に入ることが推定できた。

一方、1 年ごとのすべての 36 本雪尺データ (12 年間分、データ数は 432) を用いて標準偏差を計算すると、 $19.9 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ となった。これは、年平均表面質量収支の 73% に相当した。つまり、ドームふじでは雪尺 1 本で 1 年間の測定には、真値±標準偏差程度の誤差が含まれ、1 本 1 年間の雪尺測定からは正確な年平均表面質量収支の推定は難しいことがわかった。

3.3. 負の年間表面質量収支及びドームふじコアでの年層欠損の推定

12 年間の 36 本雪尺測定結果では、37 カ所で年平均表面質量収支が 0 以下になった (=8.6

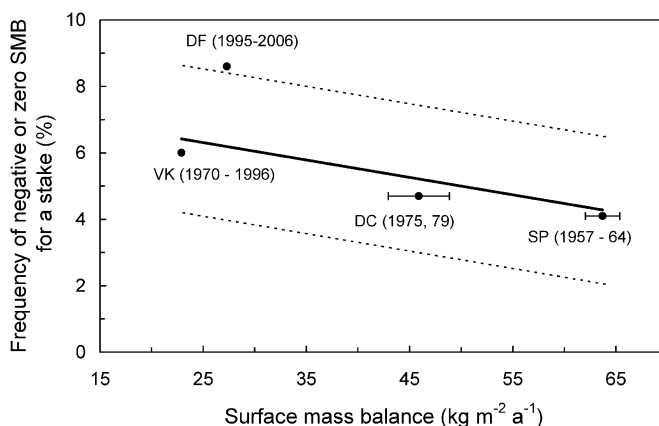


図 5 ドームふじ、ボストーク、ドーム C 及び南極点における年平均表面質量収支と負の年間表面質量収支の発生頻度 (%) との関係。点線は 95% の信頼区間を示す。

Fig. 5. Relation between annual surface mass balance (SMB) and frequency of negative or zero SMB at Dome Fuji (DF), Dome C (DC), South Pole (SP) and Vostok (VK). Dotted lines indicate the 95% confidence interval for each dataset.

%, ここでは負の年間表面質量収支*と呼ぶ)。これは、降雪や氷晶、飛雪などの涵養に比べ、風による削剥や雪面での昇華蒸発が卓越した結果である。南極氷床内陸の他の 3 地点 (ボストーク、南極点、ドーム C) と比較した結果を図 5 に示す (データは以下の文献から引用。ボストーク: Ekaykin *et al.*, 1998, 南極点: Mosley-Thompson *et al.*, 1995, ドーム C: Petit *et al.*, 1982; Palais *et al.*, 1982)。ここでは、4 地点での雪尺測定数が異なるので、それぞれの地点ごとの測定数の重みをつけた最小 2 乗誤差により、直線近似とした (ドームふじ: 432 データ, ボストーク: 2678 データ, 南極点: 216 データ, ドーム C: 253 データ)。点線で 95% の信頼区間を示す。この結果、年平均表面質量収支の増加とともに負の年間表面質量収支の割合が減少することがわかった。この関係式を外挿すると、年平均表面質量収支が $190 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以上の地点では負の年間表面質量収支が 95% の信頼水準で起こらず、正の年平均表面質量収支が期待できることがわかった。なお、地域により異なるが、例えば Giovinetto and Zwally (2000) よると、 $190 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ の地点はおおよそ標高 1500–2500 m に相当する。

一方, Ekaykin *et al.* (1998) は、ボストークでの積雪ピット観測とグロス β 測定によって得たボストークでの年層欠損確率 (probability of hiatus) が 12.7% であり、これは雪尺で積雪層が 1 cm 未満となる確率とほぼ等しいことを示した。つまり、積雪層が 1 cm 未満の場合に

* 実際は 0 以下の表面質量収支を対象としているが、ここでは簡単のための「負の年間表面質量収支」と呼ぶ。これは単に 1 年後の雪尺高さが等しいか、もしくは高くなっていることを示すだけで、コアやピットでの年層欠損 (hiatus) と似ているが異なる概念である。つまり、「負の年間表面質量収支」の場合、1 年後に雪尺が高くなったとしても、測定期間内で「大きな削剥」があった場合、その後堆積した「小さな涵養」を含んでいる可能性がある。

は、積雪の圧密過程のためにピットやコアでは年層が識別できなくなることを示している。この基準をドームふじに適用すると、1995年から2006年のドームふじでの年層欠損確率は、10.4%であることがわかった。

一方、氷期のドームふじでは年平均表面質量収支が $18 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 程度（現在の約 70%）と推定されている（Watanabe *et al.*, 2003）。図 5 の回帰直線（傾きは、 $-0.052\%/\text{kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ）を使うと、氷期のドームふじでは 9.4% の確率で負の年間表面質量収支が起こることが推定できる。これと同じ割合で年層欠損も増加すると仮定すると、氷期のドームふじでの年層欠損確率は 11.4% と推定できる。

4. ま と め

1995 年 1 月から 2007 年 1 月までのドームふじに設置した 36 本雪尺のデータと表面積雪の密度データから、過去 12 年間の年平均表面質量収支を $27.3 \pm 1.5 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ と見積もった。この値は、ドームふじ浅層コアから推定された西暦 1260 年から 1993 年までの平均値 ($26.4 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, Watanabe *et al.*, 1997) と近い値であった。また、ドームふじの 1 本の雪尺を 1 年間観測しただけでは、測定結果は平均値の 73% の誤差範囲を持つが、10 年間積算すると誤差範囲が 10% 以下になることがわかった。また、ドームふじでは負の年間表面質量収支が 8.6% の確率で起こっていることがわかった。この結果とポストーク、南極点、ドーム C での同様な観測結果と比較することにより、南極氷床の内陸域では負の年間表面質量収支は年平均表面質量収支の増加とともに減少し、 $190 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以上の地点では負の年間表面質量収支が 95% の信頼水準で起こらず、正の年平均表面質量収支が期待できることがわかった。地域により異なるが $190 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ の地点はおおよそ標高 1500–2500 m に相当する。また、ポストークでのピット観測結果を参考にして、現在及び氷期のドームふじコアでの年層欠損確率をそれぞれ 9.4%, 11.4% と見積もった。

なお、Kameda *et al.* (2008) では今回紹介した 1995 年から 2006 年までの表面質量収支のデータを用いて、年平均表面質量収支の頻度分布、月平均表面質量収支とその標準偏差との関係、月平均風速と月平均表面質量収支の標準偏差との関係、連続した 2 年間の負の年間表面質量収支は起こるが 3 年間続くことはない事、なども議論した。興味のある方は参照してほしい。

謝 辞

本研究は、ドームふじ研究計画及び第二期ドームふじ研究計画傘下の雪氷基本観測小委員会（委員長: 高橋修平教授）にて立案され、実施された。第一期ドームふじ観測計画の研究代表者、渡邊興亜博士（元国立極地研究所長）及び第二期ドームふじ観測計画の研究代表者、藤井理行博士（国立極地研究所長）に深く感謝します。また、現地での雪尺測定に携わった

東 信彦・上田 豊(第36次隊), 古川晶雄(第36次隊, 第40次隊), 藤井理行(第37次隊), 山田知充・鈴木啓助(第39次隊), 西村浩一(第41次隊), 斉藤隆志(第43次隊), 藤田耕史・杉田興正(第44次隊), 東久美子(第45次隊), 五十嵐誠(第46次隊), 斎藤健(第47次隊), 福井幸太郎・Chung Ji Woong(第48次隊)の各氏に深く感謝します。匿名の査読者及び編集担当者(古川晶雄氏)によるコメントは的確であり, 本原稿を大いに改良することができた。記して感謝します。

文 献

- Azuma, N., Kameda, T., Nakayama, Y., Tanaka, Y., Yoshimi, H., Furukawa, T. and Ageta, Y. (1997): Glaciological data collected by the 36th Japanese Antarctic Research Expedition during 1995–1996. JARE Data Rep., **223** (Glaciology 26), 83 p.
- Bamber, J.L. and Payne, A.J. (2004): The Mass Balance of the Cryosphere: Observations and Modeling of Contemporary and Future Changes. Cambridge, Cambridge University Press, 644 p.
- Ekaykin, A.A., Lipenkov, V.Ya. and Barokov, N.I. (1998): Temporal-spatial structure of snow accumulation field at the vicinity of Vostok Station, central Antarctica. Vestnik St. Petersburg Univ., Ser. 7, Geologiya, Geographiya, **1998** (4), 38–50 (In Russian with English summary).
- Giovinetto, M.B. and Zwally, H.J. (2000): Spatial distribution of net surface accumulation on the Antarctic ice sheet. Ann. Glaciol., **31**, 171–178.
- Kameda, T., Azuma, N., Furukawa, T., Ageta, Y. and Takahashi, S. (1997): Surface mass balance, sublimation and snow temperatures at Dome Fuji Station, Antarctica, in 1995. Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol., **11**, 24–34.
- Kameda, T., Fujita, K., Sugita, O. and Hashida, G. (2007): Glaciological data collected by the 44th Japanese Antarctic Research Expedition during 2003–2004. JARE Data Rep., **298** (Glaciology 32), 92 p.
- Kameda, T., Motoyama, H., Fujita, S. and Takahashi, S. (2008): Temporal and spatial variability of surface mass balance at Dome Fuji, East Antarctica, by the stake method from 1995 to 2006. J. Glaciol., **54**, 107–116.
- Mosley-Thompson, E., Thompson, L.G., Paskievitch, J.F., Pourchet, M., Gow, A.J., Davis, M.E. and Kleinman, J. (1995): Recent increase in South Pole snow accumulation. Ann. Glaciol., **21**, 131–138.
- Palais, J.M., Whillans, I.M. and Bull, C. (1982): Snow stratigraphic studies at Dome C, East Antarctica: an investigation of depositional and diagenetic processes. Ann. Glaciol., **3**, 239–242.
- Petit, J.R., Jouzel, J., Pourchet, M. and Merlivat, L. (1982): A detailed study of snow accumulation and stable isotope content in Dome C (Antarctica). J. Geophys. Res., **87** (C6), 4301–4308.
- Takahashi, S. and Kameda, T. (2007): Snow density for measuring surface mass balance using the stake method. J. Glaciol., **53**, 677–680.
- Takahashi, S. and Watanabe, O. (2001): Snow accumulation (surface mass balance). Antarctica: East Queen Maud Land, Enderby Land, Glaciological Folio, Tokyo, Natl Inst. Polar Res., 3-1.
- Taylor, J.R. (2000): 計測における誤差解析入門 (林 茂雄, 馬場 涼訳). 東京, 東京化学同人, 328 p.
- Watanabe, O., Fujii, Y., Motoyama, H., Furukawa, T., Shoji, H., Enomoto, H., Kameda, T., Narita, H., Naruse, R., Hondoh, T., Fujita, S., Mae, S., Azuma, N., Kobayashi, S., Nakawo, M. and Ageta, Y. (1997): A preliminary study of ice core chronology at Dome Fuji Station, Antarctica. Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol., **11**, 9–13.
- Watanabe, O., Shoji, H., Satow, K., Motoyama, H., Fujii, Y., Narita, H. and Aoki, S. (2003): Dating of the Dome Fuji, Antarctic deep ice core. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **57**, 25–37.